

计算机辅助工程 (CAE) 及其发展

杨鼎宁¹⁾ 邹经湘 盖登宇

(哈尔滨工业大学航天工程与力学系, 哈尔滨 150001)



杨鼎宁, 黑龙江省铁力人, 1992 年获得大连理工大学工程力学学士学位, 毕业后从事水轮机、大型发电机静、动力分析工作。1997 年获得哈尔滨工业大学一般力学硕士学位, 被分配到航天科技集团火箭总体设计部总体室, 开展火箭载荷、环境方面研究。2003 年获得哈尔滨工业大学一般力学博士学位, 同年进入哈工大结构工程博士后科研流动站、哈尔滨航空工业集团博士后科研工作站。累计完成航天、航空、机械领域五十余项课题, 其中包括国家自然科学基金、863 及省自然科学基金重点项目。研究重点集中于 CAE、叠层飞轮旋转松脱理论以及大型结构动力学。

摘要 CAD/CAM/CAE 三者中, 前两者概念较直观, CAE 概念则是发展的, 涵盖范围广, 比较灵活。当前, CAE 已由数值计算发展到仿真, 并向 CAD/CAM 全面融合的虚拟现实拓展。随着有限元技术的成熟以及神经网络、遗传算法等智能算法的引入, 计算机辅助工程分析不仅服务于详细设计, 而且支持总体方案设计。基于产品研发过程, 对 CAE 本身进行了分析, 全面阐述了 CAE 的目标、物理内容、算法, 说明了有限元/人工智能在方案设计中的应用。对优化技术的发展历程进行了回顾, 并展望了未来 CAE 的发展动向及若干重要问题。

关键词 有限元, 计算机辅助工程, 产品研发, 结构仿真, 人工智能

前 言

CAE(computer-aided engineering), 英文直译为计算机辅助工程, 泛指包括分析、计算和仿真在内的一切研发活动。文献 [1,2] 定义 CAE 为支持从研究开发到产品检测整个生产过程的计算机系统。CAE 的产生、发展, 依托于力学、计算机技术, 适应生产实践发展的需要。

利用计算机进行必要的分析计算, 从计算机一发明便开始了。1953 年, 人们开始运用收敛算法进行电力变压器的计算。其后, 由于有限元技术在喷气式飞机机翼结构中的成功运用 (1956 年), CAE 概念逐渐成形, 随着有限元技术的不断完善, 以及其它分析方法的不断引入, CAE 日趋成熟。

来自 3 个领域的专家形成三股力量推动 CAE 技术的发展。第 1 个领域是大学和科研院所, 优势是对算法比较熟悉, 研究中以算法和基本技术支持手段为目标, 他们为有限元、边界元以及计算机人机交互、图形处理技术的成熟做出了贡献。另 1 个领

域是软件开发公司, 如 MSC, ANSYS, SDRC 等。他们是大型软件的编制组织者, 优势体现在计算机应用及系统集成方面, 实现算法成果向实用软件的转化, 他们为 CAE 技术的成型、体系拓展和实用化做出贡献。他们同时也是许多新概念包括 CAE 概念的提出者。第 3 个领域是国内外的公司、厂矿企业和直接为其服务的研发中心。他们是 CAE 的应用层, 是将 CAE 纳入实践, 实现 CAE 成果向生产力转化的主体。他们最注重 CAE 的实际效益, 是成果的验证方和最终受惠者。事实上, 他们也是 CAE 发展的源动力。该领域人员对产品研发流程谙熟, 能从研发角度提出改进 CAE 的具体措施。

在开发 CAE 新功能方面, 三方所起的作用也不同。通常是第 3 方归纳问题, 提出方案; 第 2 方提出解决问题的具体形式, 程序; 第 1 方提供算法内核和支持手段。或者说, 第 1 方进行学术探讨, 第 3 方进行工程挖掘, 第 2 方将两方面成果 (算法和工程经验) 纳入计算机平台, 进行总的集成。

因此, CAE 的发展围绕着算法开发、软件集成、

2003-05-11 收到第 1 稿, 2004-12-22 收到修改稿。

1) E-mail: yang0810@sina.com

工程应用这3个中心环节进行. 三方面专家从3个不同角度诠释 CAE 概念和内涵. 他们的工作有并行, 有串行, 也有交互, 协同为 CAE 做出贡献.

CAE 是一项综合性工程. 技术学科的交互性发展、计算机智能化的不断提高、有限元算法的成熟以及各门实用科学的突飞猛进, 使 CAE 走出原有的数值分析体系, 给传统研发带来广度和深度的影响. 前后处理、视觉仿真、人工智能、人机交互技术的进步, 为部件仿真、虚拟开发创造了条件, 推动 CAE 向高层次迈进. 当今, 风洞、环境试验都可以通过虚拟仿真来实现, 包括应力、热、电磁、声场在内的整车、整船、整星、整机的建模分析也已不再稀奇.

作为联系工程与技术的纽带, CAE 多元的技术、广泛的应用、诸多的成果和潜能需要宏观的框架来统筹. 对其自身进行分析和分类成为必要.

算法是 CAE 的核心. 计算机辅助工程涉及到的算法很多, 大多数文献只介绍有限元、边界元以及几何计算等少数几种, 对于人工智能等新手段介绍的少; 而且, 对 CAE 在初步、详细两个不同设计阶段的应用往往不加区别. 为了给设计人员、工程人员提供更广阔的视角, 以及更多的选择机会, 基于产品研发流程和 CAD/CAE 之间的关系, 尝试对 CAE 进行综合阐述, 对 CAE 的目标、算法、内容和发展层次进行总结归纳, 对产品工程与技术科学的结合提出自己的观点, 分析不同设计阶段所应采取的相关方法, 并对 CAE 的最新应用予以说明. 这样的工作, 对工程人员建立 CAE 全局观念, 扫清学术人员的工程盲点将有所裨益.

1 CAE 与产品研发

作为分析手段, CAE 不是孤立的, CAE 与 CAD 密切相关. CAD 为 CAE 提供几何数据, CAE 为 CAD 提供更新方案, CAD 是直觉的设计, CAE 给出评测和判别标准, 并总结方法. 两者一起, 构成产品研发 (product research & development) 的内核.

产品生命周期包括产品研究、产品规划、产品设计、产品试验、产品制造、产品销售、产品使用和报废 8 个环节. 前 4 者属于产品研发范畴. 围绕产品研发、制造采用的计算机技术, 除数据管理 (PDM) 外, 一般划分为计算机辅助设计、计算机辅助制造及计算机辅助工程 3 部分, 即 CAD, CAM 和 CAE¹⁾. 三方的结合 CAD/CAM/CAE, 代表有效集成: 即不仅要保证串行方面的无缝连接, 实现中间数据完整

传递, 而且, 要在 PDM 框定的关系体系下, 尽量追求过程的并行, 即实施并行工程. 产品设计、分析、加工的有效集成有利于缩短产品开发周期, 减少对实物模型的依赖, 以及降低成本^[3~5].

研发成效取决于两个要素, 首先是研发人员的经验, 其次是业已成型的设计 / 分析方法. 其中, 传统方法和计算机辅助方法经常混合使用. 借助于完善的软硬件条件, 设计过程逐步向数字化过渡.

传统上, 产品设计分为需求定义、功能定义、原理制定、模型结构化、结构设计、细化和修改完善 7 个阶段. 在有计算机辅助情况下, 设计过程发生变化. 设计过程拆解为信息获取、产品定义、CAD 造型、CAE 分析优化、经济性评价、(拓扑) 修改和提供文档 7 个部分.

进行设计之初, 首先要明确目标, 制定任务一览表, 结合市场要求定义产品功能及子功能, 从预定的功能出发导出系统工作原理. 初步设计 (也称总体设计) 制定设计草案, 赋予功能载体特定的形状和尺寸, 实现产品结构的空间定义.

对设计草案进行评价和选择之后, 详细设计的任务是对设计进行优化, 检查是否符合标准, 是否满足加工要求. 详细设计阶段, 对虚拟产品总体设计方案的描述应该是完整和无冲突的. 修改完善环节进一步提升总体设计方案, 实现产品模型的数字化.

CAE 与新产品的先进性、可靠性、机理功能密切相关, 直接影响产品的创新程度. 与之相适应, 设计可分为创新设计、适应设计和变量设计 3 种层次.

创新设计涉及一个全新的产品概念, 及新的物理作用机理. 其中方案设计的功能得以强化, 称为概念设计^[6,7]; 适应设计是类比设计, 针对功能、形状相近的要求, 开发新产品. 需要对产品标准模型做适应性修改. 变量设计是在不改变产品功能和产品整体布局情况下, 对局部形状和尺寸进行的微调, 所需的改动量最少.

2 CAE 分析

作为 CAD/CAE/CAM 体系中最活跃的一个分支, CAE 的发展源自算法的推陈出新. 如果将 CAD, CAM 分别视为产品或加工的计算机描述的话, CAE 则应该被看作是产品被算法描述, 以及得到的算式被计算机求解两个过程的和. 算法是 CAE 的基础. 对 CAE 的分析, 不仅要结合产品, 更重要

1) 基于产品试样的计算机辅助试验分析, 被称为 CAT, 有的资料也将其纳入 CAE 范畴.

的是, 要结合算法。

2.1 CAE 目标分类

对产品的设计要求是安全、合用和经济^[8,9], 与此相适应, CAE 可以按目标分为(动、静)刚强度分析、可靠性分析和优化。与相关的设计结合在一起, 经常被称为静态设计、动态设计、可靠性设计及优化设计^[10]。

结构静态分析按静态算法对结构进行分析。通常采用有限元算法。静态分析的前提是假定产品(或部件)处于定常外界条件下, 其所受载荷是恒定量。

动态分析是对产品结构动态特性的考察。是根据给定的动态特性指标, 求解满足要求的结构设计, 或对指定设计进行预测或修改的过程。系统动态特性包括系统本身的固有频率、阻尼特性和对应于各阶固有频率的振型, 以及结构在动载荷下的响应。系统动态分析的优劣取决于两方面: 一是建立符合实际的系统动力学模型, 其次是选择有效的动态优化方法。

可靠性分析是一种概率方法, 检验产品在规定的条件下、规定的时间内、完成规定功能的能力。可靠性分析将常规分析中的设计变量看作是服从某种分布的随机变量, 根据所要求的可靠性指标, 用概率统计的方法确定零部件的主要参数和结构尺寸。

优化分析是根据优化原理和方法, 综合各方面因素, 以人机配合方式或自动搜索方式, 在计算机上进行的设计分析, 选出现有工程条件下的最佳设计方案。其分析目标是最优设计, 分析手段是计算机及其程序, 分析方法是最优化数学方法。

目标分析方法说明了分析与设计间的关系。多目标综合优化设计是当前 CAE 发展的一个热点^[11,12]。

2.2 CAE 算法

CAE 分析能力的扩大得益于计算机算法的提高。新算法的不断引入, 推动计算机辅助分析向更广更深的层次发展。总体上看, CAE 采用的算法分为基于几何模型的算法、基于数理模型的算法以及基于知识的算法^[3]。

2.2.1 基于几何模型

基于几何模型的 CAE 对 CAD 提供的几何参数进行直接处理。包含质量参数计算、机构分析等内容。

质量参数计算利用几何模型, 计算研究对象的体积重心等参数。方法包括蒙特卡罗法、单元分割法、积分公式法等。

机构分析借助于机械零件或机器人的几何模

型, 对产品进行运动分析和干涉检验。运动分析通过矩阵运算来实现。

2.2.2 基于数理模型

基于数理模型的方法运用数值手段, 结合产品的几何模型, 在离散化基础上, 进行产品静、动态及热、流场分析, 预测产品的功能。基本的数值方法包括有限元、边界元、有限差分等。其中, 有限元依赖于变分原理, 边界元和有限差分分别由积分、微分方程推导出来。这 3 种方法, 有成熟的商业软件包可供利用, 各企业也可以根据分析目标, 结合产品特点编制特定的应用程序。

3 种数值方法中, 有限元法应用得最普遍, 适用于静、动力分析, 以及热、磁、流场、声等多场分析, 对于不规则边界的场域问题处理最有成效。以静力分析为例, 它首先将考察构件分割成单元, 在每个单元建立作用力和位移之间的关系式, 然后集成各单元, 得到总体关系式, 求解该方程, 得到场在各离散节点的解。

有限元法的通用性使得它可以把固体力学、流体力学、动力学与控制等不同分支中课题的求解统一在一个框架, 组织在一个系统中。

基于数理模型, 产品的分析过程一般分为前处理、模型求解、后处理 3 个部分。其中前后处理是算法与空间模型的接口, 进行相应数据的前期准备与后期整理, 完成算式表达和结果显示。模型求解部分实现数理方程的解算。对线性化模型, 目前算法已近于成熟; 当前数理方法的主要研究方向是非线性问题和多体系统建模。

数理方法的进步与发展与计算机技术的发展直接相关, 它的运用可以最充分地调动计算机软硬件资源, 实现产品结构及功能关系的检测和优化。

2.2.3 基于知识

基于知识的方法, 也称人工智能 (AI) 方法, 是在知识的系统中实现的, 运用的主要元素是知识表达和知识处理。

人工智能研究人的思维能力, 进行人思维活动的计算机模拟。人工智能主要应用在故障诊断、配置、计划、咨询、决策和建议等方面。人工智能有思维认知和工程应用两种取向, 纳入 CAE 范畴的是它的工程科学取向, 即仿生的建模和处理技术。包括人工神经网络、模拟退火、遗传算法等^[13]。

以往, 计算机的应用是基于确定性规则, 对于含有过多不确定因素的问题, 如概念设计, 计算机较少涉足。人工智能改变了这种局面, 为不确定的知

识和经验搭建了算法平台,并具有良好的全局优化功能。

人工神经网络仿照生物神经网络的结构和信息处理机制建立模型,由一定数量按一定连接方式组织的阈值逻辑单元,即人工神经元构成。神经元之间的连接权表示神经元之间的关系。知识存储在神经网络结构和连接关系上。互连的神经元系统具有典型的非线性动力特性。

神经网络具有自组织能力,可以高精度逼近非线性函数;具有考虑冗余的并行处理机制,以及对各种信息兼收并蓄的综合建模和优化计算功能。可以根据经验学习并将所学到的知识推广应用,应用于分类、建模、映射和联想等方面,并适用于不确定性问题,因此可以在概念设计中得到应用。

神经网络分为前向传播、径向基、Hopfield 反馈以及模拟退火等类型。

遗传算法模拟达尔文的遗传选择和自然淘汰的生物进化过程,是 1975 年由美国 Holland 教授率先提出的。

遗传算法将问题的每一个可能看作是群体中的一个个体(又称为染色体),将每一个染色体编码成串的形式,再根据预定的目标(某一设计主要约束条件)函数对每个个体进行评价,给出一个适应度数值。算法根据适应度进行它的寻优过程。遗传算法的寻优过程通过选择、杂交、变异三种遗传操作来实现,它的搜索能力由选择算子和杂交算子决定,变异算子保证算法能搜索到全局最优解,而不是局部最优。

概念设计是引导设计人员走出仿制、发挥创造性的必由之路,人工智能服务于概念设计,为创造性设计开辟了一条新路。

实际设计分析中,往往不能孤立地使用一种算法。神经网络、遗传算法经常和有限元算法相结合;有限元前处理过程经常调用几何分析数据。对产品进行系统分析需要考虑多方面因素,算法组合是一条有效途径。

人工智能的引入,丰富了 CAE 的手段,拓展了 CAE 的领域,打破了经验与算法之间的鸿沟,拉近了概念设计与 CAE 之间的距离。由于其本身更接近于人类的思维,正日益成为 CAE 中比较活跃的分支。

2.3 CAE 的物理内容

根据研究对象的物理属性,CAE 可以分为物性计算、静力计算、动力计算、运动(干涉)计算、CAE

热计算、流场(包括风洞仿真)分析、塑性分析、疲劳分析、噪声分析等。CAE 依据物理条件建立模型,进而加以求解。截然不同的物理过程,有时甚至可以用相同的数学或知识模型来表述。

计算机在容量、处理速度方面的进步,向量化、并行性、智能化技术的发展,以及各种精度高、效率高、功能全的通、专用软件包的开发,为求解复杂物理过程提供了牢固基础和可靠保证。

CAE 分析的进一步发展,兼顾宏观、细观和微观 3 个层次的需要,如产品中采用的复合材料就是宏、细观相结合。

从物理方面来看,多层次、多种物理过程的耦合分析是 CAE 发展面临的课题。借助于耦合分析,可以有效预测、评价多种因素作用的产品反应^[2]。

2.4 CAE 的层次化发展

从发展层次看,现代分析的特点,一方面是实现局部到整体的跨越,即从服务于细化设计的零部件分析迈向整体化系统分析;另一方面是从孤立的产品分析向产品、环境、人综合模拟的方向迈进。从这方面来考察,CAE 分为数值计算、仿真模拟以及虚拟现实(VR/Virtual Reality)技术相交汇的 3 个层次。

最初级的 CAE 分析是数字化手法,包括分析零部件过程中所采用的数值算法和关系列式,以及针对特定问题编制的软件包。数值分析的目的是计算部件在外载作用下的应力变形,优化部件结构,对部件做出功能和安全的预测。分析过程中,通常要对结构的材料、几何特性进行相当程度的简化,将周围环境的作用简化到节点或相应的算式因子上。

基于数字模型的仿真是当前 CAE 应用的主流。区别于对零部件的数值计算,仿真是针对产品的某项功能,在系统一级进行的。仿真建立的模型和考虑的因素更加全面,所考察的功能可以在一个模型中实现。依据功能,仿真可以分为运动仿真、控制仿真、静动态结构仿真、装配仿真、工艺仿真等。同一产品,根据不同的考察目的,应该建立不同的仿真模型。如结构仿真条件下,需要建立相关的运动学模型、动力学模型,或考察接触状态的非线性模型等。不同功能模型之间的结果可以相互传递和调用。抽象模型相同的产品可以共用相同的仿真模型。

根据仿真,人们能够及早对产品性能做出定性和定量的预测。仿真模型可以在相当大程度上替代试验结构和产品的物理样机,可节省时间并降低成本。

结构仿真的基础是数字样机,数字样机也称虚拟

产品。通过虚拟产品,能在产品开发阶段预测出实际产品的外形和性能,进而可以比较各种解决方案,实现对设计草案的适应性调整和修改。仿真的有效实施,可以有效降低研制成本,缩短开发周期,提高产品可靠性。

借助于图形处理和模拟技术的进步,CAE 不止于数值解算和系统仿真,而且向虚拟开发的方向迈进。虚拟现实代表 CAD 与 CAE 的全面融合,是一种更高阶和全面的仿真。虚拟现实将结构仿真、控制仿真、加工仿真及产品实际使用条件结合在一起,进行全生命周期跟踪仿真。虚拟现实综合了产品与环境,吸纳了人机对话技术,将人/环境纳入分析域,允许用户直接进入模型域,直接对产品加以操作,经由动力学、人机控制工程等分析手段,使人的感官得以全新激发,因而是高度集成化、更全面的仿真。虚拟现实的技术基础是三维表达技术,人机对话技术,载荷、环境(包括流场声场)模拟技术,以及适时性要求。虚拟现实综合了医学、各种物理如力、热、流体以及自动化技术,它的实现是各项仿真技术共同提升的结果。基于计算机的完整虚拟对象,具有产品在生命周期内所必需的全部功能,融入了产品规划、设计、加工、应用及再利用方面的主客观要求^[2]。

CAE 的 3 个发展层次中,层次越高,与计算机技术结合得越紧密,除基本的运算功能外,还发挥了交互式、图形处理等功能。

虚拟现实既是 CAD 的高端,也是 CAE 技术的高端,是两项技术的统一。以汽车研制为例,目前已实现虚拟风洞环境下,对虚拟汽车结构和气动外形的分析评测^[14~16]。

3 CAE 应用发展的新趋势及应用案例

在 CAE 发展的前期,CAE 是替代产品实物试验的被动分析过程。如同实际试制、试验和评价的步骤一样,使用计算机来进行分析和仿真,对试制品的性能和功能做出检测,以减少试制品的制作次数为目的。随着有限元算法的成熟,以及人工智能、仿真等新技术手段的引进,当今,CAE 发展的一个显著特点,是已与设计过程同步,不仅应用于详细设计的评估校核,而且用于指导初步设计。

本节按照企业传统开发习惯,将产品设计归并为初步设计和详细设计两个阶段。对每个阶段,以代表性的案例说明 CAE 应用的新趋势。

3.1 初步设计与 CAE/CAE 应用层分类

初步设计研究满足功能要求的总体几何形状和结构,以及产品大致性能走向、强度预测和机构分析。通常同步于产品的总体设计和方案设计。如前所述,概念设计与创造性的初步设计相联系。初步设计包含判断、检索、模拟、构架等内容。

初步设计具有可塑性大、推理性强、专业性强、潜在作用因素多的特点。传统的作法是由人工直接定义整体方案,必要的结构和功能参数借助于解析计算,辅以简单的计算机编程。将 CAE 应用于初步设计,要综合运用有限元、人工智能、质量参数计算手法,对部件质量、结构和连接关系进行大幅度的简化,对环境条件做出合理等效。必要时,可以将结构降维处理,以保证主参数计算的可行。初步设计 CAE 对于优化产品整体的布局、动静特性以及气动热力性能有明显效益。基于知识进行判断、选择的人工智能方法,具有经验、推理和优化能力,可用于方案阶段的拓扑布局、参数定义及其它概念性设计。国内外目前从事这方面研究的比较多。J.Cagen, D.Degentesh, Yin Su^[17] 利用模拟退火算法分析了三维零部件布局。赵正佳,黄洪钟等人依据有限元神经网络建立了铁路起重方案专家系统^[18], E.Kita 和 H.Tanie^[19] 应用边界元法分析了遗传算法优化连续体结构的拓扑和形状优化, Masahiro Sugimoto^[20] 应用并行遗传算法同时解决拓扑、形状和作动器分配、反馈系统等约束优化。P.Hajela, E.Lee, 和 H.Cho^[21] 解决了格结构和框架结构的拓扑优化, M.S.Ewing, K.Downs^[22] 将遗传算法用于矩形机翼的拓扑优化。

在航空航天、兵器舰船等行业,由于系统构成复杂,各分系统相互制约、产品试样滞后等原因,前期整体建模成为必要。如火箭结构的整体动态特性,通常在设计一开始前就应明确,以利于结构、控制等分系统的设计。目前,在航天、航空等产业均已实现基本建模。基于 NASTRAN, I-DEAS 软件,作者所在课题组先后完成某巡航弹惯导系统、核电储能飞轮控制机构以及某型号火箭的整体建模(1D)分析。航天科技集团、上飞公司等单位先后利用 FORTRAN 程序及 NASTRAN 软件进行了火箭(1D)、卫星及某型号飞机的前期建模。船舶领域,基于一维梁的船体振动模态分析,已逐步让位于二维模型(压扁的船体及结构部件)以及三维立体杂交/全船模型。舷外水的影响,通过刘易斯保角变换方法、有限元或边界元计算。由于产品结构的不确定性,建模前需要做相当量的前期准备工作,如结构预测、载荷简化等,有时要根据研究目标的特殊性,在方案阶

段对同一产品进行多方面建模^[23,24]。如阿里安5火箭,在研制初期,便建立了横向(1D)、纵向(1D)以及整体(3D)三个模型,分别研究载荷/控制条件、POGO效应以及飞行动力总体环境,其中有效载荷(卫星)通过子结构技术纳入整箭模型。为增加火箭整箭动力仿真的可靠性,我国邱吉宝^[25]提出运用子结构模态综合技术,将局部小型试验与计算机总体仿真相结合,取代目前实尺全系统试验的具体方法。

文献[26]基于有限元模型,说明了大型航天器整体概念设计方法;Kettil P, Wiberg N E^[27]探索了CAE整体建模技术在桥梁设计上的应用,Bottasso, Yamakawa^[28~30]等对潜艇、飞机整体建模时连接单元的处理进行了说明。

将CAE应用于系统分析,可以促进CAE专业化发展,密切CAE与骨干行业的关系。根据应用对象的不同,可以将CAE分为飞机CAE,导弹CAE,汽车CAE,机车车辆CAE,船舶CAE,发电设备CAE等等。这种分类,处于应用层面,等级是最高的。

3.2 详细设计与CAE

详细设计是进行细致的几何形状修改,并完成确认的过程。当前,有限元法在部件级详细设计分析上已近成熟。新的应用趋势,一方面在于数理方法的深化,其次是人工智能算法的应用,以及人工智能与数理模型相结合的算法。

结构分析方面,杨鼎宁、李志和、谷朝红等人基于I-DEAS软件,结合水口、岩滩、哈三、三峡等工程,先后完成水轮机组、汽轮机关键部件的建模计算,研究内容涉及静态、动态特性、形状/尺寸优化、非线性接触、热分析以及包含子结构的系统分析等。长春汽研所李康等人对国产轿车发动机、底盘等部件进行了分析。其它行业,如兵器、航空航天、汽车、铁路车辆船舶领域,有限元技术的应用也已达或接近成熟。

与结构分析不同,热场、流场分析主要采用差分方法。有时需要考虑流、温度场之间的耦合效应。这方面,作者基于TMG/ESC软件先后完成雷达及某飞机机舱散热的建模模拟,结果与实测数据吻合。

人工智能在详细设计阶段的应用,目前还处在发展期。以结构计算为例,方法是先构造出具有若干个自由度的神经元,将计算力学中有限元的刚度矩阵以神经元间的权值来描述,将结构外载荷作为输入,设计与实际有限单元相对应的神经计算单元,再将其耦合以求解该力学问题。利用神经网络系统对

框架结构、热力学、流体力学等问题的仿真解算,求解速度可以达到 10^{-9} s的数量级。

Hajela和Berke^[31]探讨了神经网络在结构分析和设计中的应用,在优化过程中利用具有很高近似分析精度多层神经网络模型来代替结构详细分析计算。Szewczyk和Noor^[32]构造了混合网络计算系统分析几何非线性问题。Takeout^[33]构造了一种线性网络模拟有限元分析过程,并实现了一维电磁场泊松方程有限元计算的神经网络数值模拟。Papadrakakis^[34]将前向神经网络应用于结构可靠性分析。Liu GR, Zhou JJ^[35]利用有限差分与遗传算法相结合的方法识别设计参数。

3.3 结构优化与多学科设计优化

优化作为分析的反问题,与设计紧密相关,是CAE和CAD在高端上的结合。

优化在规定的各种设计条件下,将实际设计问题转化为数学最优化问题,利用最优化理论、方法,在计算机上进行自动调优计算,从满足各种设计要求及限制条件的全部可行方案中,选出最优或最合理的设计方案。

结构优化方面,早期采用准则法。准则法的主要特点是把寻求最优结构的工作改变为寻求满足某一准则的结构,这个准则往往是凭直觉决定的。先后出现满应力准则、满应变准则、理性准则等方法。

1960年,Schmit建议采用数学规划的理论方法来研究和求解结构优化问题。数学规划优化具有坚实的理论基础和广泛的适应性。复形法、序列线性规划法、可行方向法、惩罚函数法等方法先后被应用到结构优化上。实际应用成果证明了灵敏度分析方法的有效性和可行性。但与准则法相比较,数学规划法在结构优化规模、解算效率方面存在不足。

准则法及规划法各自遇到的困难,推动两种方法的不断交流和渗透,逐步形成近似概念法、序列二次规划法等混合方法。混合方法实用性强,自20世纪80年代初以来,先后运用于桁架、梁、板、壳等结构的尺寸优化、形状优化及离散变量优化问题。大连理工大学根据混合法编制的DDDU软件,先后应用于卡车、森林火车、水泥罐等一系列工程结构物,以及复合材料、电子天线等领域。中间变量的选取、目标(约束)函数的合理近似、灵敏度(包括对中间变量)算法的改进、及针对特定结构的专有软件开发是混合法发展和应用中的主流问题^[36]。

计算机软硬件水平的提高为优化发展奠定了基础。一方面神经网络、遗传算法等灵活、适应性强的

算法为方案优化、拓扑优化、全局优化的开展创造了条件;另一方面,除连续设计变量、单一目标、确定性的优化问题外,人们开始注意考虑离散、多目标以及不确定因素的影响,开展多目标、离散条件及基于可靠度的优化设计,或考虑健壮性的优化设计;此外,受益于计算机辅助设计/分析和计算机辅助图形学的发展,优化在交互式及可视化方面取得进展,逐步与有限元技术相结合,被纳入到大型 CAE 程序中。

随着优化分析规模及应用领域的逐级扩大,近些年来,结构优化设计逐步转向复杂大系统的建模分析。大型复杂系统包含的设计变量多,涉及的学科及工程领域广,需要解决多领域耦合的系统优化问题,促成了多学科优化技术的发展。

多学科优化 MDO(multidisciplinary design optimization) 从更高层次考虑产品的设计、生产,在系统而不是部件范畴应用优化技术。它利用分布式计算机网络技术集成各个学科(子系统)的知识,基于工程系统中相互作用的协同机制,和有效的组织、管理手段,进行复杂系统及其子系统设计。按照所涉及学科的不同,多学科优化建立不同的模型,并确立相关的耦合变量与参数,进行并行计算。有关耦合数据,以及设计变量,目标及约束值数据可在多级计算机间传输。

MDO 的研究内容包括三个方面: 1. 面向设计的各门学科分析方法和软件的集成; 2. 探索有效的 MDO 算法,实现多学科(子系统)并行设计,获得系统整体最优解; 3. MDO 分布式计算机网络环境。

截至目前,多学科优化主要应用于航空航天飞行器以及新型车辆的研制上,涉及的学科包括气动、结构、功能、控制,发展的算法包括并行子空间、协作优化以及多层递阶优化等。Sobieski^[37] 利用协作算法进行飞机气动、结构、性能一体化设计, Renaud^[38,39] 将并行子空间算法应用于机械构件和机电产品设计, Hajela^[40] 应用单级优化算法探索了民用飞行器气动/性能/结构/控制一体化设计方法。

进行多学科的协同优化,除需完善结构分析、强度计算、计算流体力学、动力分析、稳定校核等学科模块外,还要考虑内部与外部的数据通讯条件,使用标准的 CAD 和图形系统,建立多学科软件的集成环境^[41]。

多学科优化基于学科(子系统)协同取得设计方案,实现系统最优设计。其并行的处理方式,提高了

设计效率,有助于缩短产品研发周期。多学科优化用优化原理为产品的全寿命周期设计提供了一个理论基础和实施办法,其内涵与现代制造技术中的并行工程思想相一致。

从结构角度分析,优化分为尺寸、形状、拓扑、布局、材料和类型六个优化档次,档次越高,优化的效益越明显,但实施的难度越大,需要人参与得越多;从层次上看,优化分为参数优化和方案优化,两者相辅相成构成完整的优化体系;从目标上看,优化包括多目标优化和整体系统优化,在局部优化与整体优化间有合理、科学匹配的问题;从应用领域上看,除制造业的产品设计外,优化还广泛应用于国土资源开发、环境监控、生态保护、海洋工程、管理决策等领域;从概念上分析,任何“优化”都是发展的,它随着人类的进步,科学技术的发展而不断地发展,趋向更优^[42]。

优化技术跨越式的发展,使其成为 CAE 中比较活跃的分支。借助于神经网络、遗传算法等灵活、适应性强的算法,优化不仅在传统的尺寸、形状、拓扑技术方面取得成果,而且其自身“广义性”本征为 CAE 带来新的活力^[43,44]。借助于优化及其他(包括控制)技术的进步,在 CAE 研究对象由局部上升到整体的同时,分析人员的工作性质也由被动逐步向主动转变^[45]。

3.4 CAE 与 CAD 数据集成

有效的数据集成是 CAD/CAM/CAE 集成的先决条件。为保证 CAD/CAM/CAE 三者的有效集成,需要保障数据的交互畅通,即不同的 CAD/CAM/CAE 系统之间能够自由地进行数据交换。其中, CAD 与 CAM, CAD 与 CAE 的数据交换是两个关键。作为 CIMS 中两个主要的环节,早期的 CAD 与 CAE 技术的研究、软件的研制和工程应用,几乎是同时独立进行的。实体模型技术的出现,为纵向集成,即基于同一模型,统一地进行产品设计和分析打下了基础。但在实际中,由于大型 CAD, CAE 软件通常分属于不同的开发商,各公司依据各自的软件功能、环境、算法,开发出彼此独立的主模型及数据格式。造成 CAD, CAE 数据的人为割裂,阻碍两者有效的数据交换。

因此,进行 CAD/CAM/CAE 数据交换,除通讯规则标准化外;还要推行 CAD/CAM/CAE 数据的标准化。国际标准化组织制定的新一代数据交换标准 STEP(产品模型数据交换标准),包含从初步设计、详细设计到生产准备、生产制造,直至生产出

产品全过程的所有数据交换的方法。除 STEP 外,工程上广泛采用的标准还包括 IGES, PDDI, PDES 等。

为实现 CAD/CAE 数据集成,工程上依赖 3 种途径:第 1 种是采用同一公司开发的集成化软件,如 SDRC 公司的 I-DEAS,软件本身含有 CAD, CAE 功能,提供主模型建模手段和统一的工程数据库;第 2 种方法是利用大型商用 CAD, CAE 软件之间的两两接口程序。通常这种转换程序由软件公司有偿提供,缺点是对彼此对接 (CAD/CAE) 的软件的版本有严格要求;第 3 种方法利用应用程序与 STEP, IGES, PDDI 等标准数据之间的数据交换界面,以标准格式为媒介,实现不同系统之间的数据交换。这种方法适应性强,可以实现不同设计、分析软件平台之间的数据传递 [45,47]。

到目前为止,大多数 CAD 软件都支持 STEP 规范,但大多数 CAE 建模及数值分析软件都不支持 STEP 标准中的工程分析应用协议。文献 [48] 提出 DAIM(产品设计和工程分析集成信息模型)方案。利用 STEP 提供的四个层次的实现方法,即中性格式文件、访问内存数据结构的应用程序界面以及共享数据库、知识库,实现产品设计及分析的跨企业、跨软件平台的集成化实施。

由于工程问题的特殊性,以及开发环境的多样性,大型工程项目的实施,涉及多种计算机辅助工具。DAIM 方式,即基于 STEP 标准和 TCP/IP 通讯协议(或协议、技术、标准)的集成化技术开发,可以被视为未来 CAD, CAE 数据集成的方向 [2,49,50]。

4 结束语

完善的计算机软硬件资源是实施 CAE 的物质基础。从产品角度看,CAE 是对特定产品开展的特定研发活动;从研究角度看,CAE 代表一定条件下,广义的分析仿真水平。无论是 CAE 平台软件的开发,还是针对具体产品的 CAE 活动,都需要创造性。工程人员驾驭 CAE 资源的能力,影响产品的创新程度。

CAE 概念的发展,依赖于有限元,但 CAE 本身并不等同于有限元。CAE 直接面向工程应用,对各种复杂物理现象实现本质表征。

CAE 是计算力学、控制、信息等技术在应用领域的系统集成。各学科的协同发展,有力地推动了 CAE 技术的普及和提高。从部件级的分析走向系统集成,从结构优化到多学科优化,从产品为核心的

仿真到人/环境/计算全面融汇的虚拟现实,为制造业的柔性发展带来前所未有的机遇。伴随着 CAE 的全面进步和人工智能、敏捷制造、并行工程、计算机集成制造系统 (CIMS) 等项目的实施,现代企业进入新的发展阶段 [26,51~61]。

参 考 文 献

- 曹丽荣,朱宁春.现代 CAD 及其相关技术.北京:电子工业出版社,1996.192 (Cao Lirong, Zhu Ningchun. Modern CAD and Relative Technology. Beijing: Electronics Industry Press, 1996. 192 (in Chinese))
- Molina A, Bell R. Reference models for the computer aided support of simultaneous engineering. *Int J Computer Integrated Manufacturing*, 2002, 15(3): 193~213
- Yasuda K. CAD/CAM/CAE Nyuumon. Japan: Ohmsha, 1999
- Gunter S, Lothar KF. Management der CAD-Technik, Munchen. Carl Hanser Verlag, 1997
- 宁汝新,赵汝嘉,欧宗瑛. CAD/CAM 技术.北京:机械工业出版社,1999 (Ning Ruxin, Zhao Rujia, Ou Zongying. CAD/CAM Technologies. Beijing: Machinery Industry Press, 1999 (in Chinese))
- 邓家祺,韩晓建,曾峭.产品概念设计.北京:机械工业出版社,2002 (Deng Jiati, Han Xiaojian, Zeng Xiao. Product Conceptual Design. Beijing: Machinery Industry Press, 2002 (in Chinese))
- 孟明辰,韩向利,并行设计.北京:机械工业出版社,1999 (Meng Mingchen, Han Xiangli. Concurrent Design. Beijing: Machinery Industry Press, 1999 (in Chinese))
- 孙新民,张秋玲,丁洪生.现代设计方法实用教程.北京:人民邮电出版社,1999 (Sun Xinmin, Zhang Qiuling, Ding Hongsheng. Modern Design Method and Practical Lecture. Beijing: The People's Post Press, 1999 (in Chinese))
- 钟万勰.计算结构力学与最优控制.大连:大连理工大学出版社,1993 (Zhong Wanxie. Computational Structural Mechanics and Optimal Control. DUT Press, 1993 (in Chinese))
- 邹经湘.结构动力学.哈尔滨:哈工大出版社,1997 (Zou Jingxiang. Structural Dynamics. Harbin: HIT Press, 1997 (in Chinese))
- Lammer L, Meibner U, Petersen M. Object-oriented integration of construction and simulation models. *Computers & Structures*, 2001, 79: 2143~2149
- 白书清,李伯虎,谈凤奎,贾振元.航天器现代集成制造系统研究.计算机集成制造系统,2001,7: 1~6 (Bai Shuqing, Li Bohu, Tan Fengkui, Jia Zhenyuan. research on spacecraft contemporary integrated manufacturing system. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2001,7: 1~6 (in Chinese))
- 黄洪钟,赵正佳.基于遗传算法的方案智能优化设计.计算机辅助设计与图形学学报,2002,5: 437~441 (Huang Hongzhong, Zhao Zhengjia. intelligent conceptual design based on genetic algorithm. *Journal of Computer-aided Design and Computer Graphics*, 2002 5: 437~441 (in Chinese))

- 14 Bryson S, Levit C. The virtual wind tunnel. *IEEE Computer Graphics and Application*, 1992, 12(4): 451~468
- 15 Dai F, Felger W, Fruhauf T, et al. Virtual prototyping examples for automotive industries. In: Proceedings of the Conference Documentation "Virtual Reality World '96" [M/CD], 1996.
- 16 Gobel M. Industrial application of VEs. *IEEE Computer Graphics and Application*, 1996, 16(1): 10~13
- 17 Cagan J, Degentesh D, Yin S. A simulated annealing-based algorithm using hierarchical models for general three-dimensional component layout. *Computer-Aided Design*, 1998, 36: 781~790
- 18 赵正佳, 黄洪钟, 陈新等. 基于现代设计技术的铁路起重机方案设计专家系统. 铁道学报, 1999, 4: 25~28 (Zhao Zhengjia, Huang Hongzhong, Chen Xin, et al. Advanced technology-based designing expert system for railway crane plan. *Journal of the China Railway Society*, 1999, 4: 25~28 (in Chinese))
- 19 Kita E, Tanie H. Topology and shape optimization of continuum structures using GA and BEM. *Structural Optimization*, 1999, 17: 130~139
- 20 Masahiro S, Hiroshi Y. A study on simultaneous optimization by parallel genetic algorithms. In: Proceedings of the First China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems. Xi'an: Xidian University Press, 1999. 241~248
- 21 Hajela P, Lee L, Cho H. Genetic algorithms in topologic design of grillage structures. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 1998, 13: 13~22
- 22 Ewing MS, Downs K. Optimization of a rectangular Cross-section Wingbox Using Genetic Algorithms. AIAA-96-1536-CP, 1996. 1858~1867
- 23 Barthg D, Romeuf T. 阿里安 5 运载火箭的动力学模型. 见: 阿里安 5 结构与环境文集. 航天一院 19 所, 1996, 12: 1~26 (Barthg D, Romeuf T. Dynamic model of Ariana V launch vehicle. In: Structure and Environment Papers on Ariana V. Beijing: 19th Institute of CALT, 1996, 12: 1~26(in Chinese))
- 24 Botkin ME. Structural Optimization of Automotive Body Components Based on Parametric Solid Modeling. *Engineering with Computers*, 2002, 18(2): 109~115
- 25 邱吉宝, 王建民. 运载火箭结构动力分析的一些新技术. 导弹与航天运载技术, 2001, 2: 29~34 (Qiu Jibao, Wang Jianmin. Some new techniques for structural dynamic analysis of launch vehicle. *Missiles and Space Vehicles*, 2001, 2: 29~34(in Chinese))
- 26 Chiesa S, Sciuva MD, Testore L. Launch vehicles conceptual design and structural analysis: an integrated approach via FEM. *Aircraft Design*, 1999, 2: 117~145
- 27 Kettil P, Wiberg NE. Application of 3D Solid Modeling and Simulation Programs to a Bridge Structure. *Engineering with Computers*, 2002, 18(2): 160~169
- 28 Bottasso CL, Detomi D. A Procedure for Tetrahedral Boundary Layer Mesh Generation. *Engineering with Computers*, 2002, 18(1): 66~79
- 29 Yamakawa S, Shimada K. Hexhoop: Modular templates for converting a hex-dominant mesh to an all-hex mesh. *Engineering with Computers*, 2002, 18(3): 211~228
- 30 Lin CC. Finite Element analysis of a computer hard disk drive under shock. *Journal of Mechanical Design*, 2002, 124(3): 121~125
- 31 Hajela P, Berke L. Neural networks in structural analysis and design: an overview. *Computing Systems in Engineering*, 1992, 3(1-4): 525~538
- 32 Szewczyk ZP, Noor AK. A hybrid neurocomputing /numerical strategy for nonlinear structural analysis. *Computers & Structures*, 1996, 58(4): 661~677
- 33 Takeout J, Kosugi Y. Neural network representation of finite element method. *Neural Networks*, 1994, 7(2): 329~335
- 34 Papadrakakis M. Structural reliability analysis of elastic-plastic structures using neural networks and Monte Carlo simulation. *Comput Mech Appl Mech Eng*, 1996, 136(1-2): 145~163
- 35 Liu GR, Zhou JJ, Wang JG. Coefficients identification in electronic system cooling simulation through genetic algorithm. *Computers & Structures*, 2002, 80: 23~30
- 36 程耿东. 结构优化新方法及其计算机实现. 力学与实践, 1992, 14(1): 1~6 (Cheng Gengdong. New methods for structural optimization with computerizing. *Mechanics and Practice*, 1992, 14(1): 1~6(in Chinese))
- 37 Sobieski IP, Kroo I. Aircraft Design Using Collaborative Optimization. AIAA-96-0715, Nevada: AIAA, 1996
- 38 Renaud JE, Gabriele GA. Improved coordination in non-hierarchic system optimization. *AIAA Journal*, 1993, 31(12): 2367~2373
- 39 Renaud JE, Gabriele GA. Approximation in non-hierarchic system optimization. *AIAA Journal*, 1994, 32(1): 198~205
- 40 Hajela P, Bloebaum CL. Application of global sensitivity equations in multidisciplinary aircraft synthesis. *Journal of Aircraft*, 1990, 27(12): 1002~1010
- 41 Kodyalam S, Sobieszcarski SJ. Multi-disciplinary design optimization-some formal methods, framework requirements, and application to vehicle design. *Int J Vehicle Design*, 2001, 25(1/2): 3~22
- 42 李泉永. 机械结构优化设计的回顾与展望. 桂林电子工业学院学报, 2000, 20(4): 114~119 (Li Quanyong. A prospective review on the research and application of optimal design of structural and mechanical system. *Journal of Guilin Institute of Electronic Technology*, 2000, 20(4): 114~119 (in Chinese))
- 43 中国现代设计法研究会. 实用广义优化学. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989 (China Modern Design Method Research Group. Practical Generalized Optimism. Beijing: China Construction Industry Press, 1989 (in Chinese))
- 44 郭书祥, 吕震宙, 李为吉等. 论基于概率模型的结构可靠性优化设计. 空军工程大学学报 (自然科学版), 2001, 2(2): 67~70 (Guo Shuxiang, Lu Zhenyu, Li Weiji, et al. Probabilistic reliability based on optimization of structures. *Journal of Airforce Engineering University (Natural Science Edition)*, 2001, 2(2): 67~70 (in Chinese))

- 45 钱令希. 关于结构力学发展的思考. 计算力学, 1994, 11(1): 1~8 (Qian Lingxi. On development of structural mechanics. *Computational Mechanics*, 1994, 11(1): 1~8(in Chinese))
- 46 唐荣锡. CAD/CAM 数据管理技术. 北京: 国防工业出版社, 1990 (Tang Rongxi. Data Management Technology. Beijing. National Defense Industry Press, 1990(in Chinese))
- 47 周来水, 廖文和, 余国华. CAD/CAE/CAM 集成系统的数据结构研究与实现. 南京航空航天大学学报, 1995, 27(2): 235~242 (Zhou Laishui, Liao Wenhe, Yu Guohua. Study and realization of data structure of integrated CAD/CAE/CAM systems. *Journal of NUAA*, 1995, 27(2): 235~242 (in Chinese))
- 48 朱恒山, 邓家祺. 产品设计和工程分析集成信息模型. 计算机集成制造系统, 2002, 7: 522~526 (Zhu Hengshan, Deng Jiati. Product Design and engineering analysis integration information model. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2002, 7: 522~526 (in Chinese))
- 49 Shin Y J, Han S Y. Data enhancement for sharing of ship design models. *Computer-Aided Design*, 1998, 30 (12): 931~941
- 50 Peng J, Law KH. A Prototype Software Framework for Internet-Enabled Collaborative Development of a Structural Analysis Program. *Engineering with Computers*, 2002, 18(1): 38~49
- 51 Kirsch U. Implementation of combined approximations in structural optimization. *Computers & Structures*, 2000, 78: 449~457
- 52 金咸定. 船舶结构动力学的进展与信息化. 振动与冲击, 2002, 21(4): 1~6 (Jin Xianding. Advance in ship structure dynamics and application of information technology. *Journal of Vibration and Shock*, 2002, 21(4): 1~6(in Chinese))
- 53 武际可. 计算力学非线性分析的现状与展望. 计算力学, 1993, 10(2): 193~198 (Wu Jike. Review and overview of non-linear numerical analysis in computational mechanics. *Computational Mechanics*, 1993, 10(2): 193~198(in Chinese))
- 54 程耿东. 计算力学学科发展刍议. 计算力学, 1993, 10(2): 187~192 (Cheng Gengdong. Review on the development of computational mechanics. *Computational Mechanics*, 1993, 10(2): 187~192 (in Chinese))
- 55 倪先平, 蔡汝鸿, 曹喜金. 直升机技术发展现状与展望. 航空学报, 2003, 24(1): 15~19 (Ni Xianping, Cai Ruhong, Cao Xijin. Present situation and prospects of helicopter technology. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2003, 24(1): 15~19 (in Chinese))
- 56 Zienkiewicz OC. Achievements and some unsolved problems of the finite element method. *Int J Numer Meth Engng*, 2000, 47: 9~28
- 57 陈宗基, 黄浩东, 秦旭东. 飞行控制系统虚拟原型技术. 计算力学, 2002, 23(5): 441~447 (Chen Zongji, Huang Haodong, Qin Xudong. Virtual prototyping for flight control system. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2002, 23(5): 441~447 (in Chinese))
- 58 龚尧南. 计算固体力学的发展及其在航空航天工程中的应用. 计算力学, 1993, 10(2): 199~209 (Gong Yaonan. Development of computational solid mechanics and its application in the aerospace engineering. *Computational Mechanics*, 1993, 10(2): 199~209(in Chinese))
- 59 程耿东, 曾勇. 工程结构有限元模型化知识系统. 计算力学, 1993, 10(2): 59~65 (Cheng Gengdong, Zeng Yong. Knowledge structure of finite element modeling. *Computational Mechanics*, 1993, 10(2): 59~65 (in Chinese))
- 60 Ahmed KN, Atluri SN. Advances and trends on computational structure mechanics. *Journal of AIAA*, 1987, 7: 977~995
- 61 钟万镛. 计算力学学报 20 年. 计算力学, 2003, 20(1): 1~2 (Zhong Wanxie. 20 years with Chinese Journal of Computational Mechanics. *Computational Mechanics*, 2003, 20(1): 1~2 (in Chinese))

RESEARCH ON CAE AND ITS DEVELOPMENT

YANG Dingning ZOU Jingxiang GAI Dengyu

(Department of Astronautic Engineering and Mechanics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract Among the family of CAD/CAM/CAE, CAD and CAM are more straight-forward in concept, while CAE covers a wider area and is fast developing. Now CAE has developed from numerical computation to simulation, towards a realization of virtual reality with CAE and CAD being closely combined. With the development of FEM and new artificial intelligence algorithms including ANN and GA, not only detailed designs but also global designs are supported by CAE. On the basis of a R & D scheme, CAE is analyzed in terms of its target, physical content and algorithm. The application of finite-element-based and AI-based algorithms in conceptual design phase is illustrated. Advances of the modern design optimization are reviewed. The progress of CAE and some important research directions in a near future are discussed.

Key words FEM, CAE, product R & D, structural simulation, AI